

論文96-33B-11-9

디지털 자기 기록 시스템에서 부분 응답 신호의 검출 방식

(A Detection Method of Partial Response Signaling On the Digital Magnetic Recording Systems)

金 暎 桓 *, 邕 成 煥 **, 劉 哲 雨 **, 康 昌 彦 **, 洪 大 植 **

(Young-hwan Kim, Sung-hwan Ong, Cheol-woo You, Chang-eon Kang,
and Dae-sik Hong)

요 약

PR-IV 자기 기록 시스템의 신호 검출에서는 일반적으로 문턱값 결정의 Three Level Detection(TLD)과 Viterbi 알고리즘을 이용한 Maximum Likelihood Sequence Detection(MLSD)이 사용된다. MLSD는 TLD보다 신호 대 잡음 비의 전력효율에서 약 3 dB의 이득을 얻는다. 하지만, 반면에 계산량이 많고 하드웨어가 복잡해지는 문제점이 있다. 따라서, 위의 문제를 보완하기 위하여 본 논문에서는 문턱값 검출시 비교적 많은 오류가 발생하는 구역의 등화기 출력값을 적응등화기의 탭계수 갱신오차를 이용해 보정하는 오차 조절 검출 기법을 제안한다. 제안된 검출 기법의 성능을 선형 채널과 비선형 왜곡을 고려한 채널 모델에 적용하여 비교한 결과, MLSD보다는 떨어지지만 TLD에 비해서는 약 0.5 ~ 1.3dB의 이득이 있다. 또한 MLSD보다 계산량이 적고 구조가 간단하다.

Abstract

On PR-IV magnetic recording systems, the maximum likelihood sequence detection(MLSD) method is optimum. But it has the problem of the complexity of the structure. The three level detection (TLD) method can be used, which has simpler structure than MLSD, but requires almost twice of power to achieve the same probability of error as MLSD does. Therefore a new detection method(Error Controlled Detection: ECD) is proposed which has much simpler structure than MLSD and gives much better performance than TLD. The simulation results show that the performance of ECD is better than that of TLD by approximately 0.5 ~ 1.3dB both in linear and nonlinear channels.

1. 서 론

디지털 자기 기록 시스템에서는 정보가 기록 전류의 변화에 의한 자속의 변화로 기록 매체에 포화 기록이

되고, 기록된 자화의 변화율에 비례하여 정보를 복원한다^[1]. 이러한 자기 기록 시스템의 고유한 미분 특성에 착안하여 자기 기록 채널을 “부분 응답” 채널로 모델링하기 시작하였다^{[7] [8] [9]}. 특히 디지털 자기 기록 매체가 고밀도일 때는 PR-IV 신호가 적용되고, 신호 검출 기법으로는 MLSD와 문턱값 결정을 통한 TLD 기법을 사용한다. MLSD 방식은 최적의 검출 방법으로 성능이 우수하나, 많은 계산량과 구조의 복잡성이 단점으로 드러나 있다^{[2] [3]}. TLD 방식은 구조가 간단한 반면에 성능 면에서 MLSD보다 크게 떨어지는 단점이 있다. 따라서, 이 논문에서는 문턱값 검출시 오류가 많이 발생하는 구역의 값을 상관 관계가 존재하는 전·후 심볼

* 正會員, 三聖電子 情報通信本部

(Samsung Electronics CO., LTD., Information & Telecommunication Systems Business)

** 正會員, 延世大學校 電子工學科

(Dept. of Electronic Eng. Yonsei University)

※ 이 논문은 정보통신부의 대학기초연구 지원사업 연구비에 의해 수행되었음

接受日: 1996年1月17日, 수정완료일: 1996年10月23日

의 등화기의 갱신 오차를 가지고 보정한 뒤에 신호를 검출하는 기법을 제안한다. 이 제안된 검출 방식은 최적의 검출 방식 MLSD보다는 성능 면에서 떨어지나 구조가 훨씬 간단하고, 문턱값 결정의 TLD기법에 비해서 주목할만한 성능 향상을 얻을 수 있다.

이 논문의 2장에서는 부분 응답 신호를 적용한 디지털 자기 기록 시스템의 개요에 대해 서술하고, 3장에서는 제안된 적응등화기 갱신 오차를 이용한 검출 기법과 그 구조에 대해서 설명한다. 4장에서는 컴퓨터 모의 실험을 통한 제안된 검출 기법의 성능을 분석하고, 5장에서 결론을 맺는다.

II. 자기 기록 시스템의 개요

1. 자기 기록 채널

디지털 자기 기록 채널은 일반 디지털 통신 채널과는 달리 히스테리시스영향으로 두 레벨(±1)만을 허용하는 포화 기록 특성 있다^[1]. 자기 기록 시스템의 선형 모델은 다음과 같은 변형된 로렌즈 펄스를 사용한다. 주어진 신호율 1/T에서 기록 매체의 미분특성을 고려한 재생 파형 v(t)는 ±1 두 레벨의 입력 신호를 a_k로 가정할 경우 다음과 같이 표현한다.

$$v(t) = \sum_k b_k h(t-kT) + n(t), \text{ 여기서 } b_k = a_k - a_{k-1} \quad (1)$$

그러나, 기록매체의 정보 기록 밀도가 높아질수록 인접 심볼사이의 간섭이 심화되고 매체의 물리적 특성에 의한 채널의 비선형성이 높아진다. 영향이 큰 비선형 왜곡현상인 천이 이동과 천이 확장을 고려한 비선형 재생 파형 채널 모델은 다음과 같이 표현된다^{[4] [5] [6]}.

$$v(t_k) = \frac{b_k}{1 + \Delta_{pw0} |b_k * b_{k-1}|} \cdot \frac{1}{1 + \left[\frac{2 \left(t_k - \frac{\epsilon_1}{4} b_k * b_{k-1} - \frac{\epsilon_2}{4} b_k * b_{k-2} \right)}{pw_{50} + \Delta_{pw0} |b_k * b_{k-1}|} \right]^2} \quad (2)$$

여기서 ε₁은 한 비트 이전 천이에 의해, ε₂는 두 비트 이전 천이에 의해 현재의 천이가 이동하는 정도를 나타내는 인자이고 천이 확장 인자는 Δ_{pw0}으로 나타내었다.

2. 신호 검출

■ 선 부호화(Precoding)와 TLD

선 부호화를 하는 가장 큰 목적은 부분 응답 신호에서 신호 검출 시에 에러의 전파 현상을 방지하기 위해서다. 선 부호화는 다음과 같은 과정에 의해서 새로운 이진 신호열 {w_k}를 구성한다.

$$w_k = x_k \oplus w_{k-2} \quad \text{PR-IV} \quad (1-D^2) \quad (3)$$

선 부호화를 행한 후 신호를 쌍극(bipolar) 신호 열로 재구성한다. 재구성된 신호가 시스템을 통과한 후에 결정된 다단계 신호를 선택한 부분응답의 규칙에 따라 그림1과 같이 검출된다. 부분 응답 채널에서 신호 대 잡음 비를 σ_s²/σ_n²로 정의 할 때, TLD를 사용하였을 경우 신호 레벨이 (±2, 0)이므로 σ_s² = 2 가 되어, 백색잡음 환경에서 오류가 발생할 확률은 다음과 같다.

$$P_e \approx \frac{3}{2} \text{Erfc} \left(\frac{d_{\min}}{2\sigma_n} \right) \approx \frac{3}{2} \text{Erfc} \left(\sqrt{\frac{\text{SNR}}{2}} \right) \quad (4)$$

여기서, $\text{Erfc}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy$, $d_{\min} = 2$

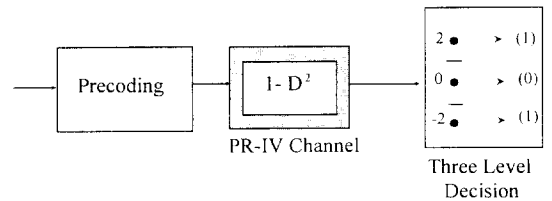


그림 1. 부분 응답 PR-IV에서의 TLD

Fig. 1. A TLD in PR-IV partial responses systems.

■ Maximum Likelihood Sequence Detection (MLSD)

자기 기록 채널에 사용된 부분 응답 신호의 검출을 위해 Kobayashi와 Forney는 MLSD를 적용하였다^[7]. 자기 기록 시스템의 MLSD에 사용하는 트렐리스도 (Trellis Diagram)를 그림2에 나타나 있다. PR-IV에 적용되는 MLSD방식의 구성 도는 그림3과 같다^{[2] [13]}. 백색 잡음 환경 하에서 MLSD를 사용했을 때 비트 에러율은 그림3의 트렐리스도에서 최소 거리가 $d_{\min} = \sqrt{2^2 + (-2)^2} = 2\sqrt{2}$ 이므로 다음과 같다.

$$P_e = \frac{3}{2} \text{Erfc}(\sqrt{\text{SNR}}) \quad (5)$$

식(4)와 비교하면 MLSD기법이 TLD에 비해 3dB의 신호 전력 이득을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

III. 오차 조절 검출 방식

부분 응답 신호에 주로 사용되는 검출 기법은 비터

비 알고리즘을 이용한 MLSD와 문턱값 검출의 TLD이다. 이 논문에서는 DVCR 시스템에서 일반적으로 요구하는 에러율을 만족시키면서 MLSD의 구조적 복잡성과 계산량을 줄이고, TLD보다 성능을 향상시키는 새로운 검출방법인 "오차 조절 검출"방식을 제안한다.

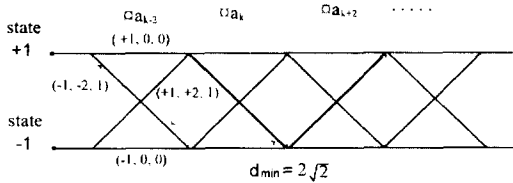


그림 2. MLSD에서의 트렐리스도(Trellis Diagram)
Fig. 2. The Trellis Diagram of the MLSD.

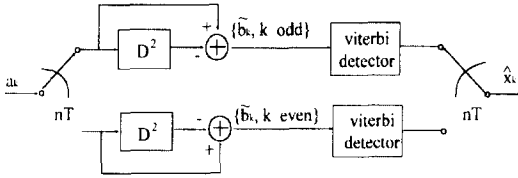


그림 3. PR-IV의 독립적으로 분리된 MLSD 검출기
Fig. 3. Maximum Likelihood Sequence Detector in PR-iv.

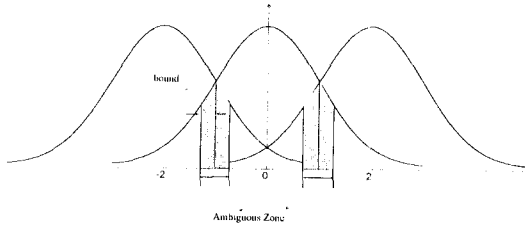


그림 4. 등화기의 출력의 확률 밀도 분포
Fig. 4. The distribution of the probability density at the output of the equalizer.

그림 4에서 보는 바와 같이, 문턱값 결정을 이용한 TLD는 ±1에서 문턱값 검출을 한다. 이때 검출 오류가 ±1 근처에서 많이 발생하는 것을 알 수 있다. 부분 응답 PR-IV신호는 ±2, 0의 3레벨의 값을 갖는데 신호의 특성상 ±2가 연속적으로 발생하지 않는다. 이와 같은 신호열의 특징으로 인하여 자기 기록 채널 통과 후의 신호 열을 부분 응답 신호로 등화할 때 등화기의 아날로그 출력값이 완전히 등화되지 못하고 문턱값 검출의 경계치 ±1 근처에 많이 존재한다. 따라서, 제안된 "오차 조절 검출"방식은 ±1 근처에 적당한 경계를 설

정하고, 등화기의 출력이 설정한 경계 안에 해당하는 경우에 검출을 보류한다. 이때 경계의 설정은 임의적으로 결정할 수 있으나 경계를 너무 작게 설정하면 오차 조절 검출방식의 성능이 악화되고, 경계를 너무 크게 설정하면 오류를 정정하는 경우보다 오히려 잘못 보정되는 경우가 많아지는 단점이 있다.

문턱값 검출이 보류된 등화기의 출력을 PR-IV 자기 기록 채널의 경우에 연관된 두 주기 전·후 등화기의 갱신 오차를 가지고 다음과 같이 보정한 후 문턱값 검출을 한다.

만일, 1-제한구역 <math>|\hat{b}_k| < 1</math>+제한구역
 그러면, 보정된 $\hat{b}_k = \hat{b}_k - \hat{e}_{k-2} - \hat{e}_{k+2}$,
 보정된 $\hat{e} = \text{TLD}(\hat{b}_k) - \hat{b}_k$

$$\hat{b}_k = \text{TLD}(\text{보정된 } \hat{b}_k) \tag{6}$$

 그렇지 않으면,

$$\hat{b}_k = \text{TLD}(\hat{b}_k)$$

여기서, \hat{b}_k 는 등화기의 아날로그 출력, \hat{e}_k 는 등화기의 갱신오차이고, \hat{b}_k 는 부분 응답 신호 ±2, 0의 3단계 값이며, TLD는 3단계 검출기를 의미한다. 또한 보정된 \hat{b}_k 와 보정된 \hat{e}_k 는 제안된 검출 방식에 따라 보정된 뒤의 값을 의미한다.

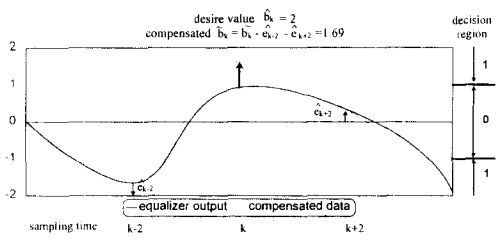


그림 5. 오류 정정 경우 (오류가 발생했을 때 보상하여 오류를 정정)
Fig. 5. The ECD compensates the error.

제안된 방식에 의해 오류가 정정되는 경우를 그림 5에서 보여주고 있다. 또한 TLD에서 검출오류가 발생하는 않았지만 등화기출력이 모호한영역(ambiguouszone)에 있을 경우에 오차 조절 검출 기법을 사용하면 그림 6에서처럼 출력값 자체가 보정되어 원하는 부분 응답 신호 값에 근접하게 만들어 줄 수 있다. 그러나, 제안된 검출방식이 모든 검출 오류를 보정해주는 것은 못한다. 만약 현재 등화기의 출력이 오차 조절 검출기에서 설정한 경계 범위에 속한다고 가정할 때

보정시키는 등화기의 갱신 오차 자체가 잘못되어 등화기의 출력이 보정되지 않을 수도 있고, 오류가 발생하지 않은 경우를 잘못 보정하여 오히려 검출 오류로 만들 수도 있다. 그러나, 연립 오류의 확률이 매우 작다고 가정할 때, 오차 조절 검출 방식은 TLD에서는 없는 오류 정정 능력을 갖고 있어서 성능이 개선된다. 그림 7은 오차 조절 검출기의 하드웨어 구성도이다.

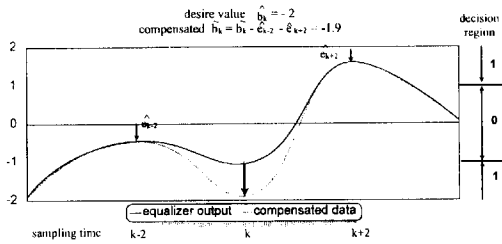
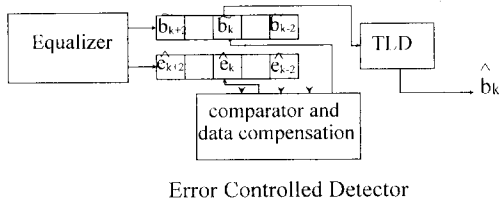


그림 6. 데이터 보상 경우(오류가 발생하지 않은 신호를 보상)

Fig. 6. The ECD compensates the data.



Error Controlled Detector

그림 7. 오차 조절 검출기의 구성도

Fig. 7. The Block diagram of the ECD.

IV. 실험 결과

이장에서는 PR-IV 자기 기록 채널에서 기존의 신호 검출 방식인 MLSD, 문턱값 검출의 TLD와 이 논문에서 제안된 오차 조절 검출 방식을 컴퓨터 모의실험을 통하여 성능을 비교하고자 한다. 이 때의 성능을 SNR (E_b/N_0 ; E_b : bit energy, N_0 : AWGN의 전력 밀도)대 비트 에러율 (BER: Bit Error Rate)의 특성 곡선으로 나타낸다.

그림 8은 자기 기록 채널에서 밀도 $p_{w50}/T=1$ 에 대한 BER 성능 곡선으로서 오차 조절 검출 기법은 10^{-5} 의 비트 에러율에서 TLD보다 0.5dB 성능 개선 효과를 가져오고, MLSD에 비해서는 1.5dB의 전력 손실이 있다. 이제 비선형 채널에서의 오차 조절 검출 기법의

BER성능을 TLD 및 MLSD와 비교해보자.

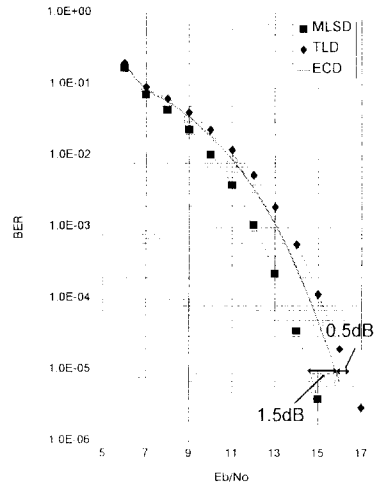


그림 8. PR-IV 자기 기록 채널에서 밀도 $p_{w50}/T=1$ 을 갖는 선형채널의 BER 성능 곡선

Fig. 8. The BER curves in the magnetic channel of the density 1.0.

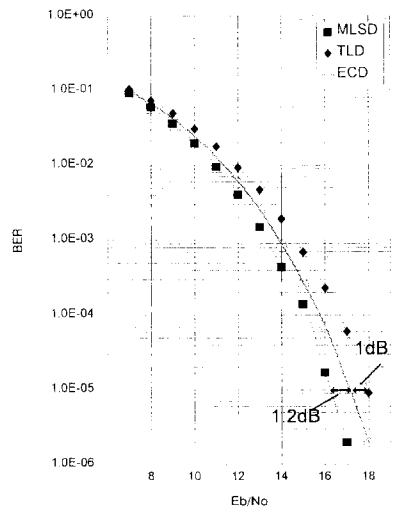


그림 9. PR-IV 자기 기록 채널에서 밀도 $p_{w50}/T=2$ 를 갖는 비선형 채널의 BER 성능 곡선

Fig. 9. The BER curves in the magnetic channel of the density 2.0.

그림 9는 밀도 $p_{w50}/T = 2$ 에 대한 BER 성능곡선으로서 오차 조절 검출 기법은 10^{-5} 의 비트 에러율에서 TLD보다 1dB 전력 이득을 갖고, MLSD방식에 비해서는 1.2 dB 떨어진다. 또한 그림 10은 자기 기록 채널

널에서 밀도 $p_{w50}/T = 2.5$ 에 대한 BER 성능 곡선으로 오차 조절 검출 기법은 10^{-5} 의 비트 에러율에서 TLD보다 1.3dB 우수하고, MLSD방식에 비해서는 1.5 dB의 전력 손실이 있다.

존재하는 전·후 심볼의 등화시 오차를 부의 방향으로 더해 주면 결국 문턱값 검출의 오류를 정정할 수 있게 되는 것이다.

V. 결론

고밀도 부분 응답 디지털 자기 기록 재생 장치에서 MLSD방식은 신호 검출 성능은 뛰어난 반면 구조가 복잡하다는 단점을, TLD방식은 구조가 간단하여 경제적 손실이 적으나 검출 성능이 뒤떨어진다는 단점을 가지고 있다. 따라서, 이 논문에서는 MLSD의 구조적 복잡성에 의한 손실을 줄이면서 TLD방식에 비해 더 나은 성능을 보일 수 있는 방식으로서, “오차 조절 검출방식”을 제안하였다. 제안된 검출 방법의 성능을 부분 응답 신호의 디지털 자기 기록 시스템의 선형과 비선형 채널 상에서 기록 밀도별로 컴퓨터 모의 실험을 통하여 MLSD, TLD의 성능과 비교 분석하였다.

실험 결과, 문턱값 검출시 오류가 많이 발생하는 문턱값 경계치 ± 1 근처의 등화기 아날로그 출력값을 제안된 검출 방법에 따라 보정한 뒤에 신호 검출을 하면, 최적의 MLSD 방식에 비해서는 성능 면에서 뒤떨어지거나 TLD에 비해서는 10^{-5} 의 비트 에러율에서 약 0.5 ~ 1.3dB의 성능 개선을 볼 수 있다.

결론적으로, 제안된 “오차 조절 검출”방식은 문턱값 결정을 하지만 모호한 구역의 등화기 출력값을 보정하여 결국 TLD의 검출 오류를 정정할 수 있으며, 간단한 장치의 추가로 현재 고밀도 자기 기록 시스템의 신호 검출에서 요구되는 비트 에러율을 얻을 수 있고, MLSD의 구조보다 훨씬 간단하다는 이점들을 가지고 있다.

앞으로는 제안된 검출 원리의 이론적 분석과 제안된 검출 원리가 디지털 자기 기록 시스템의 높은 차수의 부분 응답 채널과 다른 부분 응답 특성을 가진 통신 시스템에서 이용될 수 있는 방법이 연구되어야겠다.

참고 문헌

- [1] J. M. Cioffi, W. L. Abbott, H. K. Tharpar, C. M. Melas, and K. D. Fisher, “Adaptive equalization for magnetic-Disk Storage Channels,” *IEEE Communication Magazine*, pp. 14-29, Feb. 1990.

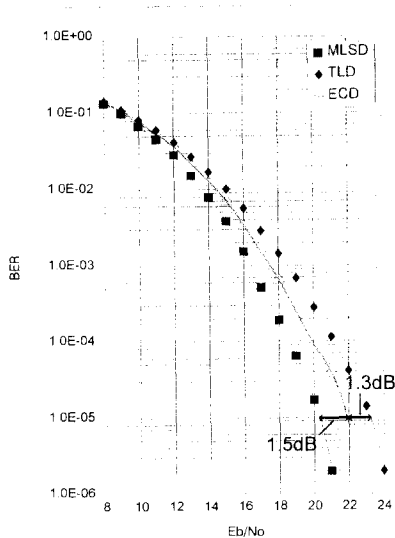


그림 10. PR-IV 자기 기록 채널에서 밀도 $p_{w50}/T = 2.5$ 를 갖는 비선형 채널의 BER 성능 곡선
Fig. 10. The BER curves in the magnetic channel of the density 2.5.

위의 결과로 살펴보면 자기 기록 매체의 기록 밀도가 높아질수록 ISI와 채널의 비선형 특성이 심화되어 채널의 상태가 열악해짐을 알 수 있다. 따라서, 등화기의 아날로그 출력값이 문턱값 결정기준이 되는 ± 1 주위에 많이 분포하게 되며, 이에 따라 제안된 검출 기법의 효율이 높아지고 결과적으로 성능이 개선됨을 뚜렷이 볼 수 있다. 즉, 비선형 채널에서 밀도의 증가에 따른 각 검출기의 성능을 보면 밀도 1에서 보다 밀도 2.5에서 성능 차이가 훨씬 분명하다. 저밀도에서는 ISI의 영향과 채널의 비선형성이 고밀도보다 작아 부분 응답 선형 등화기에서 신호열을 부분 응답 신호로 등화하는데 용이하다. 그러나, 고밀도로 갈수록 ISI의 영향이 증가하여 등화기의 아날로그 출력값이 문턱값 검출의 경계인 ± 1 근처의 모호한 구역에 많이 존재하여 MLSD와의 성능 차이가 커지게 된다. 이 때, 등화기는 모호한 구역의 신호들에 대한 등화를 정확히 할 수 없게 되는데, 이 경우에 제안된 검출 방법을 사용하면 모호한 구역의 출력값에 부분 응답 신호의 상관관계가

[2] R. D. Cideciyan, F. Dolivo, R. Hermann, W. Hirt, and W. Schott, "A PRML system for Digital Magnetic Recording," *IEEE Journal Selected Areas Commun.*, vol. 10, no. 1, pp. 38-56, Jan. 1992.

[3] R. W. Wood and D. A. Petersen, "Viterbi Detection of Class IV Partial Response on a Magnetic Recording Channel," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. COM-34, no. 5, pp. 454-461, May 1986.

[4] Nicholas P. Sands, *Nonlinear Intersymbol Interference in Digital Magnetic Recording*, 박사 학위 논문, 1993.

[5] P. Newby and R. Wood, "The Effects of Nonlinear Distortion on Class IV Partial Response," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. MAG-22, no. 5, pp. 1203-1205, Sep. 1986.

[6] Jackyun Moon and Jian-Gang Zhu, "Non-linear Effects Transition Broadening," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. MAG-27, pp. 4831-4833, Nov. 1991.

[7] H. Kobayashi and D. T. Tang, "Application of Partial-response Channel Coding to Magnetic Recording Systems," *IBM J. Res. Develop.*, vol. 14, pp. 368-375, July 1970.

[8] H. K. Thapar and A. M. Patel, "A Class of Partial Response Systems for Increasing Storage Density in Magnetic Recording," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. MAG-23, no. 5, Sep. 1987.

[9] Jaekyun Moon and L. Richard Carley, "Partial Response Signaling in a Magnetic Recording Channel," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. MAG-4, no. 24, Nov. 1988.

[10] Jae-hee Cho, Cheol-woo You, Dae-sik Hong, "The Decision Feedback Equalizer for the Nonlinear Digital Magnetic Recording System," will be published by *ICC '96*.

저 자 소 개

金 暎 桓(正會員)

1994년 2월 연세대학교 전자공학 공학사. 1996년 2월 연세대학교 대학원 전자공학 공학석사. 1996년 3월 ~ 현재 삼성전자 정보통신본부 기간네트웍 사업부 무선통신 개발실 S/W 1팀 주임 연구원. 주관심분야는 디지털 이동 통신 시스템, 신호처리, 신경회로망



崑 成 煥(正會員)

1995년 2월 연세대학교 전자공학 공학사. 1995년 3월 ~ 현재는 연세대학교 대학원 전자공학 공학석사과정. 주관심분야는 디지털 이동 통신 시스템, 신호처리, 신경회로망

劉 哲 雨(正會員) 第 33卷 A編 第 4號 參照

현재 연세대학교 박사과정 재학중



洪 大 植(正會員)

第 33卷 A編 第 4號 參照

현재 연세대학교 전자공학과 부교수 재직중.

康 昌 彥(正會員) 第 33卷 A編 第 8號 參照

현재 연세대학교 전자공학과 교수 재직중